



# Synthèse et réalisation de circuits actifs à temps de propagation de groupe négatif

Blaise Elysée Guy Ravelo, André Pérennec, Marc Le Roy

## ► To cite this version:

Blaise Elysée Guy Ravelo, André Pérennec, Marc Le Roy. Synthèse et réalisation de circuits actifs à temps de propagation de groupe négatif. 15èmes Journées Nationales Microondes, 23-24-25 Mai 2007 - Toulouse, May 2007, Toulouse, France. pp.1-4. hal-00492415

**HAL Id: hal-00492415**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00492415>**

Submitted on 15 Jun 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Synthèse et réalisation de circuits actifs à temps de propagation de groupe négatif

Blaise Ravelo, André Pérennec et Marc Le Roy

LEST – UMR CNRS 6165, UBO-ENSTBr, CS93837, 29238 Brest Cedex.

ravelo@univ-brest.fr

### Résumé

Ce travail concerne l'étude des circuits planaires actifs présentant un Temps de Propagation de Groupe (TPG) négatif. En vue de compenser les pertes inhérentes à cette caractéristique, nous présentons une topologie de cellule active constituée d'un Transistor à Effet de Champ (TEC) en cascade avec un dipôle résonant RLC série puis la méthode de synthèse associée. Les relations établies permettent l'obtention d'un TPG négatif tout en assurant les contraintes liées à la conception d'un circuit actif hyperfréquence, à savoir le gain, les adaptations aux accès et la stabilité.

Pour valider cette technique, un circuit planaire à deux étages a été réalisé. Les mesures présentent un très bon accord avec les simulations et cette étude se poursuit par les simulations temporelles correspondantes.

### I. Introduction

Certains matériaux artificiels, appelés matériaux à effet main gauche (Left-Handed = LH), présentent simultanément une permittivité et/ou une perméabilité négatives et possèdent des propriétés étonnantes singulières aux matériaux naturels lorsqu'ils entrent en interaction avec des ondes électromagnétiques [1]. Les premières réalisations furent à trois dimensions, puis à deux et enfin à une dimension sous forme de circuits planaires. Nous proposons ici des circuits planaires 1-D à base de transistors et d'éléments passifs. Pour ces circuits à base d'éléments localisés, la vitesse de groupe n'a pas de sens physique car la dimension du circuit est négligeable par rapport à la longueur d'onde. Nous nous intéressons par conséquent au Temps de Propagation de Groupe (TPG),  $\tau = -\partial\phi/\partial\omega$  où  $\phi$  est la phase du paramètre  $S_{21}$ . Pour un matériau à dispersion anormale, il a été montré que ce TPG peut être négatif. Dans ce cas, le maximum d'un signal gaussien dont le spectre est contenu dans cette bande de dispersion anormale sort du matériau avant que le maximum du signal d'entrée n'y pénètre.

Jusqu'à présent, les métamatériaux réalisés à partir d'éléments passifs étaient constitués d'un assez grand nombre de motifs identiques de façon à ce que les propriétés spécifiques (vitesses de phase et/ou de groupe négatives par exemple) apparaissent (décrit également par le diagramme de dispersion quand le nombre de cellules tend vers l'infini) [2] - [3]. Dans la bande de fréquence à TPG négatif, ces matériaux présentent systématiquement des pertes importantes. Ici, une seule cellule active suffit à générer cette propriété, avec de plus une compensation des pertes et une bonne adaptation aux accès ainsi que la stabilité à toutes les fréquences.

Pour l'instant, TPG négatif et gain n'avaient pu être obtenus avec des circuits actifs qu'en très basses fréquences (quelques  $kHz$ ) [4] ou dans le domaine de l'optique [5]. Notre objectif est de réaliser un circuit proposant simultanément ces deux caractéristiques pour des fréquences micro-ondes de l'ordre du  $GHz$ . Une méthode de synthèse de circuits actifs hyperfréquences à TPG négatif est également présentée.

### II. Topologie de la cellule active à TPG négatif

Nous avons d'abord cherché à associer la cellule initiale [3] à TPG négatif (Fig. 1-a) avec un élément actif, ici un Transistor à Effet de Champ (TEC). Cependant, après une étude topologique, nous avons retenu la cellule de base de la Fig. 1-b qui présente un meilleur compromis, particulièrement en terme de gain et d'adaptation entrée/sortie, avec une simplicité accrue. Pour pouvoir établir les relations analytiques pour cette cellule (Fig. 1-b), nous considérons le schéma équivalent basse fréquence du transistor constitué par la source de courant commandée en tension de conductance,  $g_m$  et de la résistance drain-source,  $R_{ds}$ .

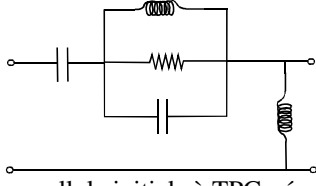


Fig. 1-a : cellule initiale à TPG négatif.

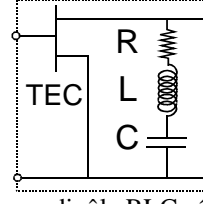


Fig. 1-b : cellule retenue, dipôle RLC série en cascade avec un TEC.

A la résonance  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , le paramètre de transmission  $S_{21}$ , l'adaptation en sortie  $S_{22}$  et le TPG  $\tau$  qui est toujours négatif sont donnés par les relations :

$$S_{21}(\omega_0) = \frac{-2RZ_0g_mR_{ds}}{R_{ds}R + Z_0(R + R_{ds})} \quad S_{22}(\omega_0) = \frac{R_{ds}R - Z_0(R + R_{ds})}{R_{ds}R + Z_0(R + R_{ds})} \quad \tau(\omega_0) = \frac{-2LZ_0R_{ds}}{R[RR_{ds} + Z_0(R + R_{ds})]} \quad (1) - (2) - (3)$$

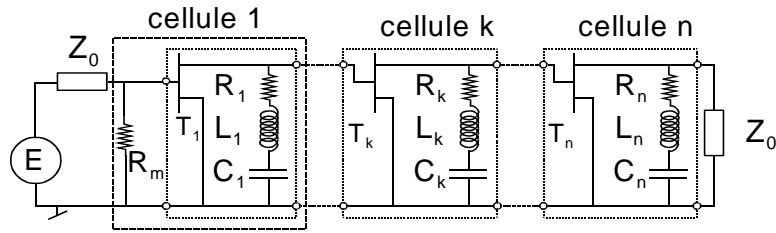


Fig. 2 : Structure de  $n$  étages de circuits idéaux en cascade.

Dans la structure à  $n$  étages (Fig. 2), une résistance  $R_m$  est insérée pour adapter l'entrée (4).

$$S_{11}(\omega_1) = \frac{R_m - Z_0}{R_m + Z_0} \quad S_{21}(\omega_1) = -\frac{2R_mR_1Z_0g_mR_{ds}}{(R_m + Z_0)(Z_0R_{ds} + Z_0R_1 + R_1R_{ds})} \quad (4) - (5)$$

En inversant (4) et (5), on peut établir les relations de synthèse de  $R_m$  (6) et de  $R_1$  (7) pour la première cellule.

$$R_m = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad R_1 = \frac{S_{21}Z_0R_{ds}(R_m + Z_0)}{[2g_mZ_0R_mR_{ds} - S_{21}(Z_0^2 + Z_0(R_m + R_{ds}) + R_mR_{ds})]} \quad (6) - (7)$$

Pour ce premier étage, le gain maximum réalisable à la fréquence de résonance est de :

$$S_{21\max}(\omega_1) = \frac{2g_mZ_0R_mR_{ds}}{Z_0^2 + Z_0(R_m + R_{ds}) + R_mR_{ds}}. \quad (8)$$

En inversant les équations (1), (3) et l'expression de la pulsation de résonance, on a respectivement les résistances interétages  $R_k$  (9), les selfs  $L_k$  (10) et les capacités  $C_k$  (11) de chaque étage. Pour assurer l'adaptation en sortie, on synthétise la résistance  $R_n$  du dernier étage à partir de (2).

$$R_k = \frac{S_{21}(\omega_k)Z_0R_{ds}}{[2g_mZ_0R_{ds} - S_{21}(\omega_k)(Z_0 + R_{ds})]} \quad L_k = \frac{-\tau_k R_k [R_kR_{ds} + Z_0(R_k + R_{ds})]}{2Z_0R_{ds}} \quad C_k = \frac{1}{L_k\omega_k^2} \quad (9) - (10) - (11)$$

A l'étage  $k$  de 2 à  $n$ , le gain maximum réalisable est de :

$$S_{21\max}(\omega_k) = \frac{2g_mZ_0R_{ds}}{Z_0 + R_{ds}}. \quad (12)$$

A noter que, les cellules peuvent avoir soit une fréquence de résonance identique pour augmenter la valeur absolue du TPG négatif, soit des fréquences différentes pour obtenir plus de gain et un TPG négatif sur une large bande de fréquences. Par ailleurs, notre objectif est d'obtenir à partir du dispositif de la Fig. 2, un TPG négatif de valeur significative, un gain de quelques dB, une adaptation en entrée et en sortie meilleure que -10 dB pour un nombre restreint de cellules tout en assurant la stabilité du circuit.

### III. Validation expérimentale

En utilisant les formules de synthèse des cellules, les objectifs définis sont atteints dans un premier temps en simulation par le dispositif hybride à deux étages réalisé en technologie planaire et fonctionnant autour de 1 GHz (Fig. 3). La Fig. 4-a montre la photo du circuit réalisé sur substrat RF35 de permittivité  $\epsilon_r = 3,5$  et d'épaisseur  $h = 508 \mu\text{m}$ . Les mesures fréquentielles (Fig. 4-b et -c) ont permis de valider à la fois le concept proposé et la méthode de synthèse : à la résonance  $f_0 = 1,03 \text{ GHz}$ , le gain est de 1,68 dB, le TPG de -2,3 ns,  $|S_{11}|_{\text{dB}}$  et  $|S_{22}|_{\text{dB}}$  sont bien inférieurs à -10 dB.

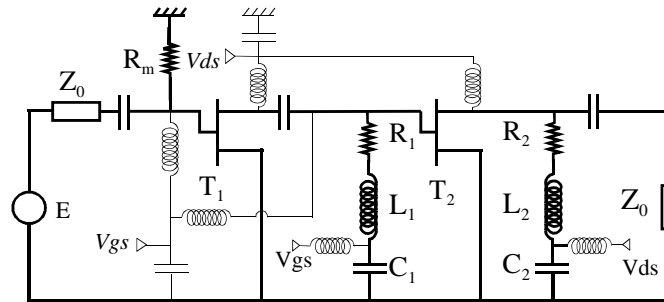
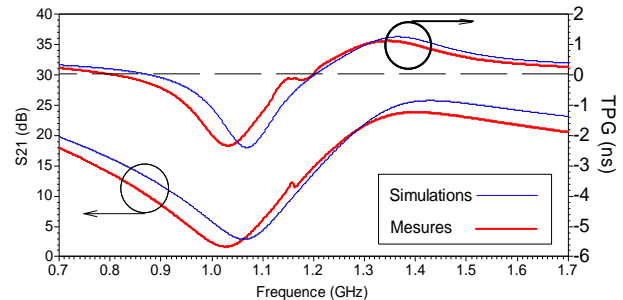
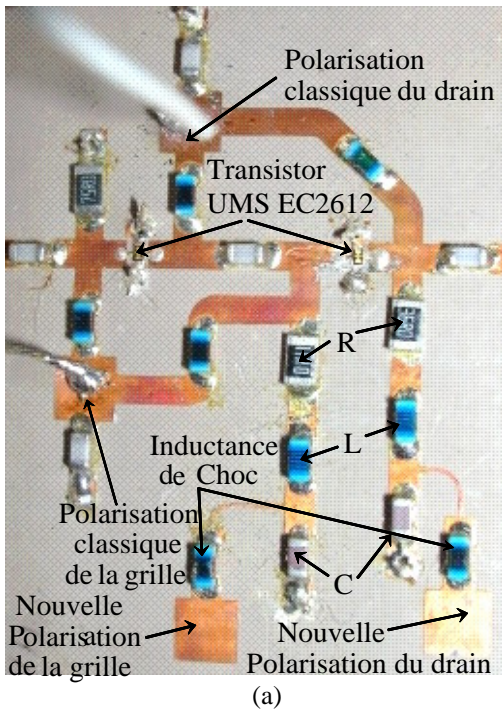
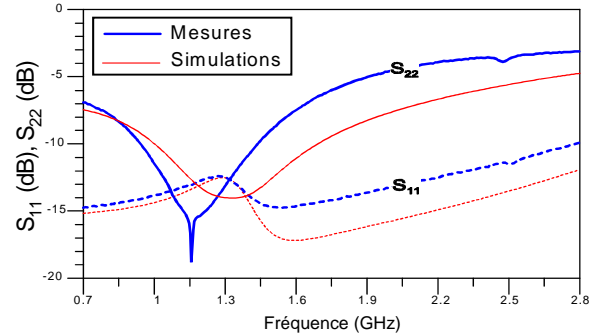


Fig. 3 : Schématique du circuit réalisé avec  $R_m = 75 \Omega$ ,  $R_1 = 11 \Omega$ ,  $R_2 = 36 \Omega$ ,  $L_1 = L_2 = 12 \text{ nH}$ ,  $C_1 = C_2 = 1 \text{ pF}$ ,  $T1 = T2 = \text{PHEMT-EC2612}$  ( $g_m = 98,14 \text{ mS}$  et  $R_{ds} = 118,6 \Omega$ ).



(b)



(c)

Fig. 4-a : Photo du circuit actif à TPG négatif réalisé (28 mm  $\times$  22 mm), -b : comparaison de  $S_{21}$  et du TPG simulés et mesurés et -c : adaptations en entrée et en sortie

En temporel, la sortie (Fig. 5-a et -b) affiche une avance de 46% de l'écart type de la gaussienne d'entrée (de valeur 4 ns modulée à  $f_0 = 1,03 \text{ GHz}$ ).

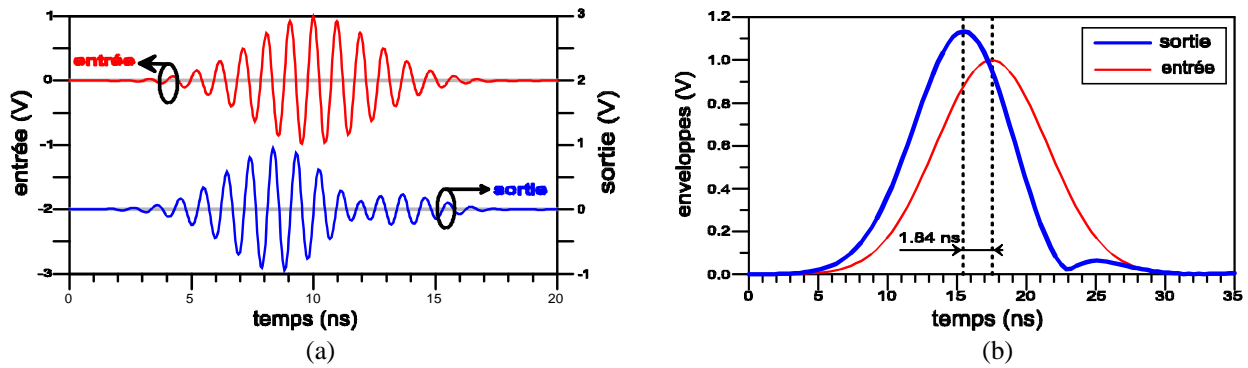


Fig. 5-a : simulations temporelles des signaux modulés et -b des enveloppes à partir des paramètres  $S$  issus de la mesure.

#### IV. Conclusion

La nouvelle topologie proposée permet de satisfaire des contraintes sévères, i.e. un gain et un TPG négatif, une adaptation en entrée et en sortie, et un circuit stable. De plus, nous proposons une méthode de synthèse associée. Il s'agit à notre connaissance du premier dispositif hyperfréquence associant simultanément gain et TPG négatif. Les résultats de simulation ont été vérifiés expérimentalement et les simulations temporelles issues des mesures fréquentielles illustrent que le maximum de l'enveloppe du signal gaussien de sortie présente une forte avance par rapport à celui de l'entrée et ceci seulement avec un circuit à deux étages. Contrairement aux circuits LH ou BIP (Bande Interdite Photonique), l'enveloppe du signal de sortie n'est pas entièrement incluse dans celui de l'entrée, mais ceci ne remet évidemment pas en cause le principe de causalité. Des mesures temporelles ont également été planifiées ainsi que la réalisation d'un dispositif à gain et TPG négatif sur une large bande de fréquence pour des signaux en bande de base. Une des applications envisageables pour le présent circuit est la compensation de dispersion en phase et l'égaliisation de TPG des filtres passe-bande autour des fréquences de coupure.

#### Références

- [1] V. Veselago, « *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$*  », Soviet Physics Uspekhi, Vol 10, n° 4, 1968, pp. 509-514.
- [2] L. Brillouin, and A. Sommerfeld, « *Wave Propagation and Group Velocity* », Academic Press, New York, 1960, pp. 113-137.
- [3] O. F. Siddiqui, M. Mojahedi, and G. V. Eleftheriades, « *Periodically Loaded Transmission Line With Effective Negative Refractive Index and Negative Group Velocity* », IEEE Trans. Antennas Propag., Vol 51, n° 10, Oct. 2003, pp. 2702- 2712.
- [4] D. Solli, R.Y. Chiao and J. M. Hickmann, « *Superluminal effects and negative delays in electronics, and their applications* », Physical Review E 66, 2002, 056601.
- [5] L. J. Wang, A. Kuzmich and A. Dogariu, « *Gain-Assisted Superluminal Light Propagation* », Nature, Vol 406, Jun. 2000, pp. 277-279.